CONTRIBUTION A L'ETUDE DU PROCESSUS DE PODZOLISATION SOUS FORET DE FEUILLUS (*)

A.-M. ROBIN

Assistante au Laboratoire de Géologie Dynamique
Faculté des Sciences, Paris

SOMMAIRE

L'observation d'une séquence de sols lessivés, podzoliques et podzols récents, formés sous feuillus à partir d'une même roche-mère (les « limons des plateaux » sableux) permet de constater, dans une même parcelle de la forêt de Fontainebleau, l'existence de deux climax : l'un, climatique, correspond aux sols lessivés sous hêtraie à mull, l'autre, stationnel, pour les podzols sous hêtraie à Mor.

L'analyse des profils ne permet pas de déceler de différence entre les sols situés sous hêtres et ceux situés sous chênes. Cependant, une expérience de percolation rejoint l'opinion générale selon laquelle le hêtre serait plus podzolisant.

Si le problème de l'origine et de la datation du podzol ne permet encore que des suppositions, la nature de la roche-mère et parfois sa variation d'épaisseur en liaison avec la végétation expliquent l'évolution des sols vers l'un ou l'autre climax.

INTRODUCTION.

Si la formation de podzols sous landes à Ericacées est un phénomène depuis longtemps reconnu et bien établi, la podzolisation sous forêt de feuillus constitue un problème plus rarement observé.

Les travaux de Dimbleby et Gill (1955), Edelmann (1960), Mackney (1961) et, en France, ceux de Duchaufour et ses collaborateurs (1947... 1959... 1968) présentent l'observation de podzols sous forêt de feuillus et étudient l'influence de cette végétation sur la pédogenèse. Le rôle des feuillus, particulièrement celui du chêne et du hêtre, reste un problème intéressant souvent difficile à cerner à cause des influences complexes de divers autres facteurs.

(*) Cette note correspond au travail d'une thèse de 3e cycle effectuée au Laboratoire d'Ecologie végétale d'Orsay, sous la direction de M. LEMEE, et soutenue à Paris en novembre 1968.

La séquence de sols observés, dont les extrêmes sont respectivement des sols bruns lessivés et des podzols, s'est développée à partir d'un même substrat de « limons des plateaux » sableux dont l'épaisseur variable au-dessus du calcaire lacustre de Beauce constitue un facteur important dans la différenciation de ces sols. Le rôle de la nature de ce matériau n'est peut-être pas négligeable.

Après une rapide évocation du cadre d'étude nous présenterons les sols pour envisager ensuite leur pédogenèse.

I. — GENERALITES SUR LE CADRE D'ETUDE.

Cette étude a été faite, en forêt de Fontainebleau, sur une parcelle de 34 ha : « la Tillaie ». Celle-ci se trouve située sur un plateau, le plus étendu des « monts » de la forêt, et son altitude varie entre 133 m et 138 m. Il faut signaler son passé particulièrement protégé parmi toutes les parcelles de cette vieille forêt royale (Domet, 1873), puis son classement en réserve biologique intégrale. Ceci permet de considérer son évolution comme une expérience naturelle particulièrement intéressante pour l'étude de la dynamique des rapports climat-sol-végétation.

A) **GEOLOGIE :**

Les sables stampiens consolidés forment des crêtes gréseuses (Alimen, 1936-1937) entre lesquelles s'est déposé le calcaire de Beauce. La sédimentation des « limons des plateaux » se fit beaucoup plus tard au Quaternaire (Cailleux, 1942-1951-1953). Ceux-ci sont en fait essentiellement des sables stampiens éolisés, comme le prouve en particulier le maximum très net entre 100 et 200 μ. La **texture sableuse** de ces limons a un rôle très important dans la pédogenèse ici considérée, ainsi que leur **épaisseur** : celle-ci variant entre 30 cm et 2 m dans cette parcelle détermine une plus ou moins grande influence du calcaire sous-jacent. La composition minérale de ces limons est donc semblable à celle des sables stampiens. Il faut remarquer leur **nature essentiellement siliceuse.**

L'aspect de la surface de la dalle calcaire souvent gélifractée en plaquettes, l'existence de poches comblées de blocs, la présence de cailloutis à la base des limons confirment l'hypothèse de **phénomènes périglaciaires** (Dupuis et Cailleux, 1955). L'existence de passages très argileux et limoneux avec des intercalations de gravillons calcaires en lits très minces rejoindrait l'hypothèse d'un « remaniement obligatoire par les eaux pour la partie inférieure du dépôt ». (Morand, 1966-1967).

Ces phénomènes quaternaires très complexes seront à préciser pour pouvoir interpréter l'origine de certains horizons pédologiques de base.

B) **CLIMAT :**

Le massif de Fontainebleau est caractérisé par une moyenne thermique de 8°85 nettement inférieure à celle du climat séquanien, et par une pluviosité annuelle de 696 mm, donc en excès notable (Doignon, 1948 ; Iablokoff, 1953).

La présence du couvert forestier détermine un microclimat sous forêt caractérisé en particulier par une amplitude nycthémérale nettement plus faible sous forêt qu'en paysage découvert (Geiger, 1959).

L'influence du climat sur les phénomènes pédologiques a été déterminée grâce à certains indices et bilans. D'une part le drainage climatique annuel calculé selon Henin et Aubert (1945) et Dupuis (1952), indique une valeur particulièrement élevée qui correspond aux podzols, de même que celle obtenue selon l'indice de Turc (1954). D'autre part, les travaux de Thornthwaite (1948) permettent d'établir un bilan hydrique mensuel et de déduire le drainage. La figure suivante (n° I), établie d'après les travaux de Arlery, Garnier et Langlois (1954) indique un excédent ou drainage s'étalant sur 5 mois, de décemble à fin avril, puis la réserve d'eau intervient pour atténuer les effets du manque d'eau avant que n'apparaisse un déficit réparti sur un peu plus de deux mois : (juillet) août et septembre.

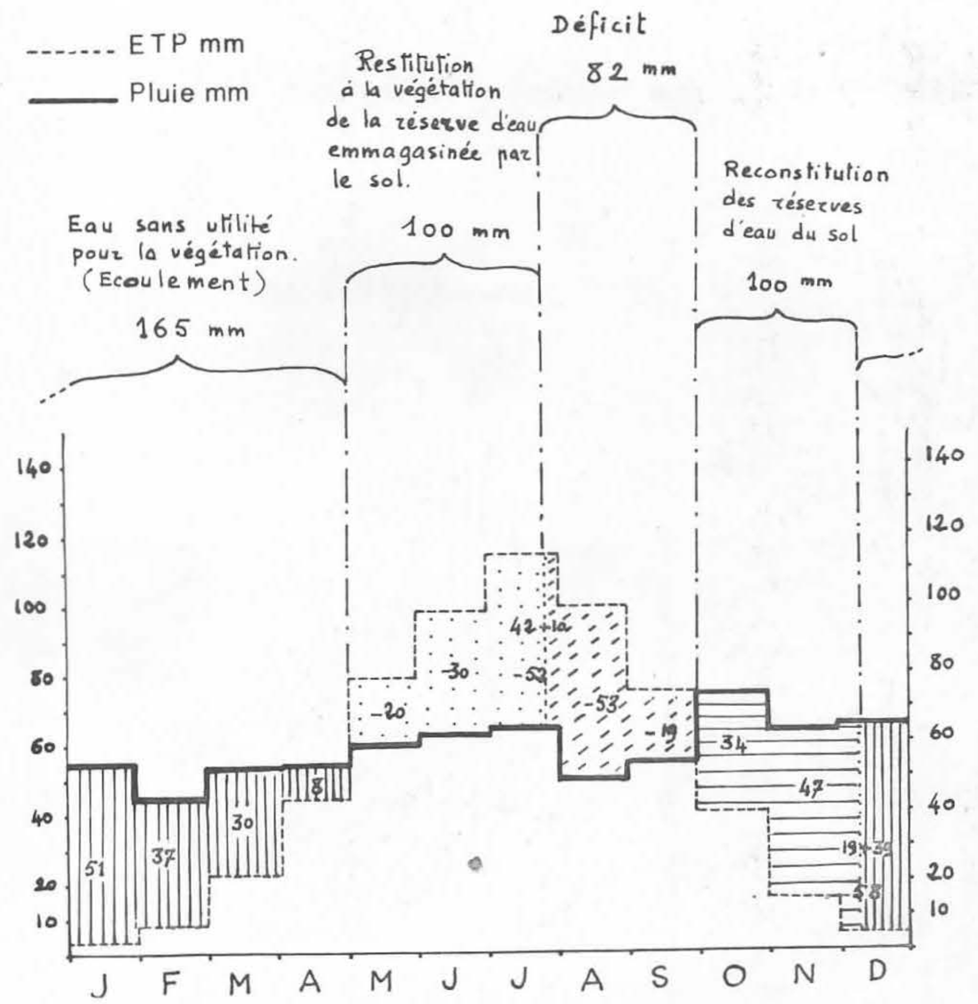


FIGURE I. — *Bilan hydrique Thornthwaite indiquant la répartition de l'eau dans le sol au cours de l'année à Fontainebleau*

La méthode de Turc (1961-1962) fournit les mêmes renseignements avec un léger décalage. On peut donc noter dès maintenant l'**importance du drainage** et d'autre part l'**existence d'un déficit,** l'ensemble des deux phénomènes ayant un rôle essentiel dans l'évolution du sol.

C) VEGETATION :

L'évolution forestière postglaciaire du Bassin Parisien a été reconstituée grâce à l'analyse palynologique des sédiments (Sauvage, 1954 ; Jalut, 1967). Après une phase périglaciaire de toundra, une phase subarctique se caractérise par l'implantation des pins et des bouleaux. L'époque boréale débute par la très grande extension du noisetier, précédant l'établissement de la chênaie mixte vers 6000 avant J.-C. La période subboréale, marquée par un refroidissement, voit l'apparition du hêtre qui devient abondant à la période subatlantique, soit vers 1000 avant J.-C. Soulignons cette **apparition beaucoup plus tardive du hêtre, par rapport à celle du chêne.** La dernière phase forestière est caractérisée par une grande diversification sous l'influence des interventions humaines.

La végétation actuelle des plateaux de limons de la forêt de Fontainebleau est représentée par de vieilles futaies formées le plus souvent de hêtres. La plus grande extension du chêne autrefois (donnée par l'analyse pollinique des horizons humifères de surface des podzols de la Tillaie. — Lemée, communication orale) et l'actuelle régénération du hêtre nettement prédominante sur celle du chêne, indiquent un **remplacement naturel du chêne par le hêtre.**

La composition floristique de la Tillaie s'organise selon Lemée (1966) en trois associations :

— le **Querceto Fageto Ilicetum acidiphile** comprenant deux faciès : chênaie et hêtraie ;
— le **Fagetalia** avec strate herbacée variée et riche en espèces ;
— un groupement de transition entre les deux associations précédentes.

II. — DESCRIPTION DES SOLS.

A) PRESENTATION :

En consultant la carte pédologique schématique de France au 1/1.000.000° présentée par Dupuis (1960), nous pouvons constater que la région de Fontainebleau correspond à des sols lessivés et des sols podzoliques, comme l'avait précédemment décrit le même auteur (1952) dans une étude des sols du Gâtinais. Ces sols ont également fait l'objet de quelques notes (Flon, 1950-1956).

Comme nous l'avons exposé dans l'introduction, nous nous sommes intéressés au problème de la podzolisation, en considérant une séquence. Sol brun lessivé et podzol sont les extrêmes entre lesquels nous avons distingué plusieurs intermédiaires : un sol lessivé, deux stades différents de néopodzolisation et un sol podzolique.

D'autre part, nous avons pu trouver chaque type de sol sous hêtres et sous chênes. Face au problème toujours actuel de la podzolisation sous feuillus, nous avons jugé intéressant de choisir deux profils pour chaque phase de cette évolution vers le podzol : l'un sous chênes, l'autre sous hêtres. L'ensemble de ces profils forme une toposéquence, car leur évolution semble en rapport avec le relief, lui-même en grande partie lié à l'épaisseur des « limons », le substrat calcaire ayant une surface grossièrement horizontale, malgré ses irrégularités. L'épaisseur de sable pédogénisé varie en effet de 30 cm à 2 m. Nous présenterons ici seulement trois des profils étudiés particulièrement typiques : un sol lessivé, un sol néopodzodique, un podzol, tous trois situés sous hêtres.

B) METHODES D'ETUDE :

1° **Sur le terrain.** Nous avons étudié les profils sur sondages à la tarière pour l'établissement de transects et sur tranchées pour l'analyse des profils. L'étude topographique a été également effectuée ;

2° **Au laboratoire.** Toutes les analyses physiques et chimiques ont été effectuées sur la terre fine (c'est-à-dire passée au tamis de 2 mm après séchage à l'air libre).

Nous avons déterminé la couleur à l'aide du code « Munsell Soil Color Chart » sur terre fine sèche et sur terre fine humide.

a) **Analyses physiques.** Les résultats sont exprimés en % de terre séchée à 105° C.

1. Humidité actuelle déterminée en étuve à 105° C.
2. Analyse granulométrique par la méthode internationale modifiée par emploi de la pipette Robinson (1939).

b) **Analyses chimiques :**

1. Dosage du calcaire total au calcimètre de Bernard.
2. Mesure du pH sur un échantillon de 10 g en suspension dans 25 ml d'eau distillée. Mesure également dans KCl N.
3. Détermination de la matière organique par calcination au four à moufle.
4. Dosage du carbone organique par la méthode Anne (oxydation du carbone par un mélange d'acide sulfurique et de $Cr_2O_7K_2$ et dosage en retour par le sel de Mohr).

L'analyse du carbone n'a pas été faite en profondeur pour cause d'imprécision de la méthode, les teneurs étant trop faibles.

5. Dosage de l'azote total par la méthode Kjehldahl ;
6. Détermination des bases échangeables par percolation à l'acétate d'ammonium. Ca et Mg ont été dosés par complexométrie (versénate).
7. Détermination de la capacité d'échange par percolation au chlorure de calcium à pH 7.
   Bases et capacité sont exprimées en milliéquivalents pour 100 g de terre.
8. Dosage du fer libre par la méthode Deb (1950), modifiée par Duchaufour (1965).
9. Dosage de l'aluminium libre par la méthode Tamm. Complexation avec l'oxalate d'ammonium et l'acide oxalique, puis colorimétrie à l'ériochromecyanine (Duchaufour et Souchier, 1966).

Toutes les analyses physiques et chimiques précitées ont été effectuées par nous au Laboratoire d'Ecologie Végétale d'Orsay.

D'autre part, les analyses de « Fe et Al complexés par la matière organique » ont été effectuées selon la méthode Duchaufour (1964), au Centre de Pédologie du C.N.R.S. à Nancy (2).

— Méthode d'extraction : traitement du sol à la soude N/10, 2 extractions.
— Méthode de dosage : Fe et Al complexés dans les fractions humiques et fulviques après précipitation de « Al minéral libre » (absorption atomique).

C) **ETUDE DES PROFILS :**

1° **Sol lessivé :**

La flore est représentée par le Fagetalia : la hêtraie pure accompagnée par une strate herbacée très riche, où l'on remarque en particulier :

— Ruscus aculeatus ;
— Brachypodium silvaticum ;
— Melica uniflora ;
— Poa nemoralis ;
— Euphorbia amygdaloïdes ;
— Polytrichum formosum.

DESCRIPTION DU PROFIL : altitude 135,9 m (voir figure n° II et tableau n° 1).

A_1 — horizon humifère, gris brun (10 YR 6/1,5-3,5/1) ;
— texture sableuse, structure en agrégats ;
— chevelu racinaire dense.

A_2 — horizon de couleur jaune (10 YR 7,5/3-6/3) ;
— texture sableuse ;
— structure particulaire.

AB — horizon de couleur orangée (10 YR 7/4 - 5/4) déjà un peu argileux, marquant un début d'accumulation ferrique ;
— texture sableuse.

B — horizon ocre rouge (7,5 YR 5,5/6-5/6) assez argileux, compact : accumulation d'argile et de fer ;
— structure polyédrique, subanguleuse, moyenne-ferme.

IIC — horizon sableux calcaire. Présence de cailloutis, puis blocs.
— couleur : 10 YR 7/4-6/4.

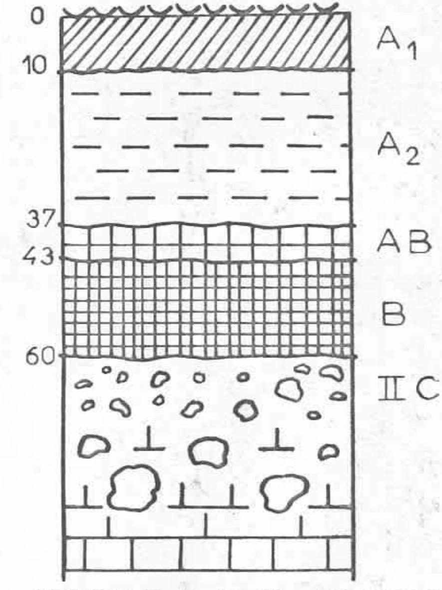


FIGURE II. — *Profil schématique*

(2) Je remercie particulièrement MM. Duchaufour et Souchier de m'avoir ainsi aidée en proposant et en permettant l'exécution de ces analyses.

FIGURES DES PROFILS SCHEMATIQUES
(D'après Duchaufour)

A_0 L - Litière fraîche de l'année.


A_0 F - Litière mal décomposée de l'année antérieure.


A_0 H - Couche humifiée.


Horizon humifère particulaire peu actif.


Horizon humifère grumeleux actif.


Argile (avec oxyde de fer absorbé).


Horizon lessivé, limoneux.


Horizon cendreux.


Accumulation de fer ferrique.


Substrat en cours d'altération.


Substrat calcaire non altéré.

Horiz.	Prof. cm	Ep. cm	Arg. %	Lim. %	Sables % en mm. 0,02–0,05	0,05–0,1	0,1–0,2	0,2–0,5	0,5–1	1–2	m.o. %	C ‰	N ‰	C/N	Bases S me %	Cap. T me %	Taux S/T	Ca me%	Mg me%	Fe libre %	Al libre ‰	pH eau	pH KCl	CO_3Ca %
A_1	0-10	10	3,0	5,0	6,8	12,8	58,5	7,5	0,2	0,0	3,90	21,5	1,16	18,5	2,0	6,5	31	1,90	0,26	0,25	0,30	4,3	3,5	0
A_2	10-37	27	3,5	9,5	9,2	12,7	59,0	6,1	0,0	0,0	0,50	0,3	0,04	8,0	0,5	2,5	20	0,45	0,09	0,35	0,36	4,7	3,8	0
AB	37-43	6	12,5	12,2	11,9	9,7	47,7	5,4	0,2	0,0	0,40	-	-	-	5,0	7,8	64	5,27	0,98	0,86	0,46	4,9	3,7	0
B	43-60	17	21,7	7,2	7,5	10,2	48,8	6,0	0,1	0,0	0,17	-	-	-	12,9	13,1	98	15,0	2,00	1,35	0,50	6,5	6,0	0
IIC	60...	...	5,5	8,5	4,5	10,3	57,0	9,2	2,4	3,2	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	0,39	-	7,8	7,6	13,8

TABLEAU 1

INTERPRETATION. — L'horizon Ao est formé par la couche L de litière fraîche et une très mince couche F.

— L'horizon A_1, bien développé, gris brun, avec une teneur en matière organique faible (3,9 %) et qui devient négligeable dans les horizons suivants, montre une décomposition rapide de l'humus par minéralisation. De plus la structure en agrégats, le C/N de 18,5 permet de définir un **mull forestier.**

— Cependant, malgré une végétation qui n'est pas du tout acidiphile, nous devons remarquer quelques résultats analytiques : forte désaturation du complexe (S/T = 31 %) et pH nettement acide (4,3).

Ceci nous permet de conclure en faveur d'un **mull oligotrophe,** à la limite avec le moder très actif.

— Les divers horizons du profil se différencient de manière très nette (en particulier A_1 de A_2). La matière organique en très faible quantité en A_2, AB et B, se minéralise très rapidement sans aucune accumulation dans les horizons minéraux.

— En A_2, pauvre en matière organique et en argiles, la capacité est faible. Le complexe absorbant est cependant désaturé, tandis que les cations métalliques, en quantité très faible en A_2 sont plus abondants en AB et surtout en B, ce qui prouve un certain entraînement. Celui-ci, néanmoins, pour la faible épaisseur de sol, peut sans doute être légèrement compensé par suite de remontées (discussion, 3ᵉ partie).

— Par rapport au sol brun lessivé non présenté ici, le complexe est nettement plus désaturé et le pH plus acide ; de plus la caractéristique de ce profil est le lessivage de l'argile et du fer.

L'horizon B montre une texture sablo-argileuse et d'autre part les surfaces brillantes du revêtement mettent en évidence le phénomène d'entraînement en révélant un horizon argillique.

— Les teneurs en Al libre dénotent une altération négligeable.

— Tout ceci permet de dire qu'il s'agit d'un **sol lessivé.**

— Une remarque à ajouter : normalement l'indice d'entraînement de l'argile comme du fer varie entre 2 et 3, pour les sols lessivés. Or, ici, cet indice atteint 7 pour l'argile et 5,4 pour le fer. L'on peut penser à un horizon B enrichi par migration et lessivage obliques, puisque ce profil se trouve dans un creux vallonné au pied d'une pente, présentant une dénivellation de 2 m. Mais l'on peut aussi considérer que ce B est antérieur à l'érosion responsable de la topographie actuelle ; son épaisseur et sa teneur en Fe, qui sont analogues à celles des horizons B des autres sols de la Tillaie, apportent un argument à cette hypothèse (nous verrons dans la troisième partie les différents problèmes que pose l'origine de cet horizon B). Ici, nous pensons pouvoir conclure de toute manière à un **sol lessivé tronqué.**

— A la base l'horizon IIC représente le passage de la phase I (roche-mère ou limons sableux) à la phase III (substrat calcaire). C'est donc un mélange de sables quartzeux et de sables, cailloutis calcaires — ensemble de texture sableuse — marque des phénomènes périglaciaires qui ont provoqué la destruction superficielle du niveau calcaire Chattien, puis le mélange avec les limons sableux éoliens. La répartition du calcaire dans les différentes fractions granulométriques des sables indique un maximum élevé dans la tranche la plus grossière, un maximum relatif dans la tranche la plus fine, le minimum, très faible, coincidant avec le maximum granulométrique des sables de Fontainebleau.

2° **Sol lessivé néopodzolique :**

Ici, la végétation correspond à un groupement de transition déjà beaucoup plus pauvre. On remarque :

— Ilex aquifolium ;

— Ruscus aculeatus ;

— Festuca heterophylla ;

— Deschampsia flexuosa ;

— Polytrichum formosum,

et la fougère Pteridium aquilinum apparaît plus souvent.

DESCRIPTION DU PROFIL : altitude 136,6 m (voir figure n° III et tableau n° 2).

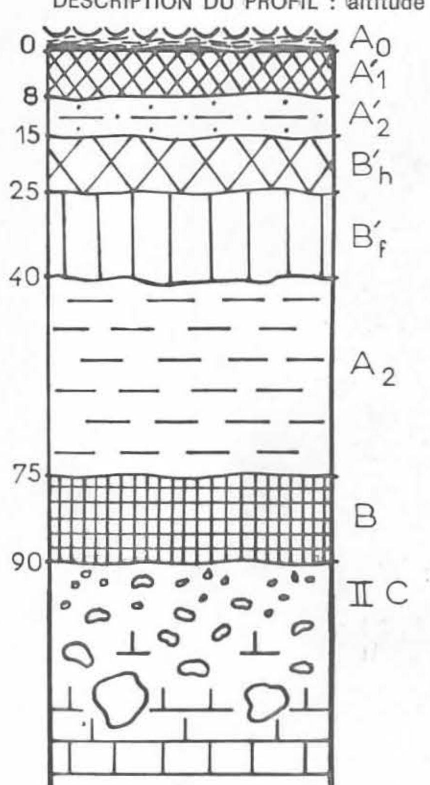


FIGURE III. — *Profil schématique*

A₀ — discontinu - 0 à 2 cm.

A'₁ — horizon humifère gris noir (10 YR, 5,5/1 - 3/1) ;
— texture sableuse, structure particulaire.

A'₂ — horizon décoloré (10 YR 7/2 - 5/2) ;
— texture sableuse, structure particulaire.

B'h — horizon de couleur chocolat teinte violacée (10 YR 6/2 - 3/3) ;
— texture sableuse, structure particulaire.

B'f — horizon jaune foncé (10 YR 7/3 - 5/3) montrant une accumulation ferrique ;
— texture sablo-argileuse ;
— structure pelliculaire instable ;

A₂ — horizon jaune clair (10 YR 7,5/2,5 - 6/3).
— texture sableuse, structure particulaire.

B — horizon rouille (7,5 YR 5/6 - 4/6) compact :
• accumulation d'argile et de fer,
• texture sableuse ;
— structure polyédrique, subanguleuse, moyenne ferme. Revêtements : horizon argillique.

IIC — horizon sableux calcaire. Couleur claire (10 YR, 7,5/2 - 6,5/3,5).

Horiz.	Prof. cm	Ep. cm	Arg. %	Lim %	Sables % en mm 0,02–0,05	0,05–0,1	0,1–0,2	0,2–0,5	0,5–1	1–2	m.o. %	C ‰	N ‰	C/N	Bases S me %	Cap. T me %	Taux S/T	Ca me %	Mg me %	Fe libre %	Al libre ‰	pH eau	pH KCl	CO_3Ca %
A'_1	0-8	8	1,1	5,0	4,1	12,5	59,0	7,4	0,2	0,0	4,7	26,9	1,35	20,0	1,51	6,70	22,6	1,20	0,18	0,16	0,18	4,1	3,2	0
A'_2	8-15	7	0,0	4,0	3,8	10,2	71,0	6,4	0,2	0,0	1,02	5,8	0,67	8,7	0,37	2,12	17,4	0,33	0,15	0,14	0,16	4,3	3,4	0
B'_h	15-25	10	0,5	4,0	6,3	9,0	71,0	7,1	0,2	0,0	1,18	5,2	0,24	21,6	0,50	3,11	16	0,30	0,15	0,28	0,35	4,2	3,5	0
B'_f	25-40	15	2,5	5,0	6,8	16,3	61,5	5,3	0,1	0,0	0,80	-	-	-	0,87	2,12	41	0,75	0,09	0,23	0,46	5,0	4,1	0
A_2	40-75	35	0,5	5,0	5,2	15,5	63,7	6,2	0,1	0,0	0,37	-	-	-	0,62	1,37	45	0,30	0,06	0,16	0,27	5,3	4,3	0
B	75-90	15	17,2	5,6	4,9	11,2	51,8	5,4	0,1	0,0	0,72	-	-	-	-	-	-	2,70	0,10	1,36	0,41	7,3	6,3	0
IIC	90...	...	13,6	16,6	4,8	9,5	35,0	8,7	3,9	3,1	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	0,50	-	8,0	7,4	39

TABLEAU 2

INTERPRETATION :

— L'horizon A_0, limité aux couches L et F, peut néanmoins se présenter avec une couche H très noire de matière organique mal décomposée et dont l'épaisseur atteint 2 cm, mais de présence très irrégulière.

— L'horizon A'_1 gris noir, de bonne épaisseur, limité à sa base de manière très nette, montre une structure particulaire : la matière organique n'enrobe pas le sable. En fait, ceci est déclenché par l'absence d'argile, ce qui empêche la formation du complexe argilo-humique, et par là même, des agrégats.

— La minéralisation est moyenne — encore assez rapide comme l'indique la teneur en matière organique (4,9 %) et le C/N de 19,3. Tout ceci permet de dire qu'il s'agit d'un **moder.** Nous pouvons ajouter, en considérant le taux de saturation bas et surtout le pH de 4,1 que c'est un **moder acide.**

— Ceci nous fait prévoir un début de dégradation. Effectivement les trois horizons suivants, portant également l'indice (') forment avec A'_1 un ensemble.

— L'horizon A'_2, très net, est déjà un peu décoloré. Il est légèrement plus pauvre en matière organique et en argiles que B'h et a corrélativement une capacité plus faible.

D'autre part, l'entraînement est déjà très net puisque cet horizon A'_2 a la teneur en Fe la plus faible du profil.

— L'horizon B'h, riche en matière organique, indique l'accumulation des composés humiques qui masquent la migration du fer. Celui-ci, déjà déposé en quantité notable, a une teneur double de l'horizon A'_2. La présence d'humus explique la capacité plus forte qu'en A'_2.

— L'horizon B'f, pauvre en matière organique, apparaît sous la couleur rouille donnée par le fer. L'indice d'entraînement est de 2. L'argile accumulée est responsable de l'entraînement du fer. On remarque une teneur en bases plus forte.

A partir de cet horizon, le pH remonte.

— La teneur en Al libre met en évidence l'altération des argiles, propre au phénomène de podzolisation. L'importance de la migration est donnée par le rapport :

$$\frac{A'_2}{B'f} = 2,9.$$

Nous sommes donc en présence d'un **sol néopodzolique** déjà évolué comme le prouvent les analyses et l'observation d'un profil formé d'horizons tous très nets et en particulier d'un A'_2 déjà clair.

Ce sol néopodzolique s'est formé à partir des horizons supérieurs d'un ancien sol vraisemblablement lessivé, dont il reste la base :

— L'horizon A_2, pauvre en argiles et en matière organique, a effectivement une capacité faible. La teneur en Fe est inférieure à celle de l'horizon supérieur : le B'f du sol podzolique.

— L'horizon B montre une accumulation très forte de Fe, tandis qu'une quantité d'Al peu supérieure à celle de A_2 ne prouve pas une altération remarquable.

— La base du profil est représentée par le mélange sablo-calcaire IIC.

— L'ensemble de ces horizons représente donc un **sol lessivé néopodzolique.**

3° **Podzol :**

Ce sol, le plus évolué de la série, apparaît sous une hêtraie acidiphile où la strate herbacée est très rare. On remarque d'autre part :

— Ilex aquifolium ;

— Pteridium aquilinum.

DESCRIPTION DU PROFIL : altitude 138 m (voir figure n° IV et tableau n° 3)

A'₀ — horizon noir, bien distinct, fibreux, riche en racines de hêtres.

A'₁₁ — horizon de couleur foncée, gris noir (10 YR 5,5/1 - 2,5/1) humifère ;
— texture sableuse, structure particulaire.

A'₁₂ — horizon brun (10 YR 6/1 - 4/1) dont la base est irrégulière ;
— texture sableuse, structure particulaire.

A'₂ — horizon décoloré blanchâtre (10 YR 7/1,5 - 5,5/2) avec de minces bandes brunes irrégulières ;
— texture sableuse, structure particulaire, cendreuse.

B' — horizon d'accumulation de Fe et d'humus ;
— couleur brun rouge irrégulière, présentant des taches jaunâtres claires (10 YR 5/2 - 7,5 YR 3/2) ;
— partie supérieure brun sombre, partie inférieure plus rouge ;
— texture sableuse, structure pelliculaire compacte.

A₂ — horizon jaunâtre (2,5 Y 7/3 — 10 YR 5,5/3) texture sableuse, structure particulaire.

AB — horizon de couleur plus foncée (10 YR 7/3 - 5,5/3,5).

B — horizon argillique (présentant des revêtements) couleur rouille (10 YR 6/6 - 5/6) ;
— texture sableuse ;
— structure polyédrique, subanguleuse, moyenne, ferme.

IIC — horizon clair de limons et cailloux calcaires (2,5 Y 7/4 - 5,5/4), texture sableuse.

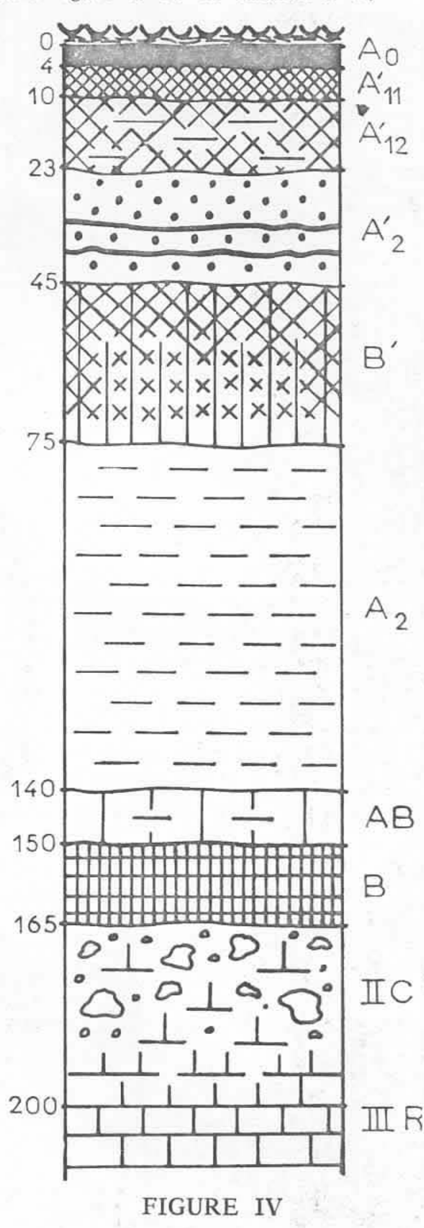


FIGURE IV

Horiz.	Prof. cm	Ep. cm	Arg. %	Lim %	Sables % en mm 0,02 0,05	0,05 0,1	0,1 0,2	0,2 0,5	0,5 1	1 2	m.o. %	C ‰	N ‰	C/N	Bases S me %	Cap. T me %	Taux S/T	Ca me %	Mg me %	Fe libre %	Al libre ‰	pH eau	pH KCl	CO_3Ca %
A'$_0$	0-4	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	294	9,10	32,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A'$_{11}$	4-10	6	0,0	2,0	1,7	11,6	59,1	6,1	0,0	0,0	8,75	48,4	2,04	23,7	1,70	8,50	20	1,44	0,33	0,13	0,20	3,4	2,8	0
A'$_{12}$	10-23	13	0,0	1,5	2,6	15,4	63,9	7,3	0,0	0,0	2,18	8,1	0,30	27,0	0,94	3,25	29	0,66	0,18	0,09	0,10	3,7	3,1	0
A'$_2$	23-45	22	0,0	2,5	2,2	15,9	72,0	6,4	0,0	0,0	0,60	2,2	0,13	17,5	0,40	0,87	46	0,36	0,15	0,07	0,07	3,8	3,4	0
B'	45-75	30	1,0	1,0	1,1	12,0	75,0	6,7	0,0	0,0	1,06	-	-	-	0,69	2,38	29	0,42	0,30	0,39	0,32	4,0	3,6	0
A$_2$	75-140	65	0,0	0,0	1,1	11,7	76,5	6,6	0,0	0,0	0,46	-	-	-	0,50	1,00	50	0,48	0,06	0,14	0,43	4,4	4,4	0
AB	140-150	10	2,0	4,0	3,6	11,3	70,2	6,1	0,0	0,0	0,46	-	-	-	1,15	1,62	71	0,75	0,33	0,40	0,32	4,9	4,3	0
B	150-165	15	11,6	9,5	9,3	10,4	50,7	5,8	0,3	0,0	0,60	-	-	-				9,3	1,60	1,15	0,43	6,5	6,3	0
IIC	165-200	35	5,5	8,5	3,0	10,7	55,7	8,2	2,2	3,2	0,00	-	-	-	-	-	-	-		0,36	-	8,0	7,5	15

TABLEAU 3

INTERPRETATION. — L'horizon A_0 est complet :

Couche L : litière de feuilles de l'année ;

Couche F : litière non décomposée des années précédentes ;

Couche H : matière organique humifiée très noire formant, grâce aux racines entrelacées, une carpette qui se décolle de l'horizon A'_1 selon une limite très nette.

C'est un vrai **mor fibreux.**

Son C/N est de : 32.

— Nous avons divisé l'horizon A'_1 en deux, l'observation permettant de prévoir une différence très nette : A'_{11} très noir contient beaucoup de matière organique (8,7 %) et a de ce fait une capacité relativement plus forte que A'_{12} de couleur brune qui contient seulement 2,1 % de matière organique.

La minéralisation est lente comme le prouvent la teneur en matière organique et le C/N de 23,7 en A'_{11}.

— L'horizon A'_2, de structure cendreuse, est blanchâtre, dépourvu de Fe et d'Al libres, de matière organique, d'argiles, de bases. Sa capacité est presque nulle.

Cet horizon blanchi est traversé par des veines horizontales, irrégulières, de couleur brun-noir ; veines humiques caractéristiques des dépôts sableux, indiquant la migration de la matière organique qui serait arrêtée et se déposerait à des niveaux de granulométrie différente.

— l'horizon B' qui contient un peu d'argile et de matière organique présente une capacité plus forte.

— L'accumulation de Fer libre se traduit par un indice d'entraînement de 5,6.

— D'autre part, l'Aluminium libre également a migré, ce qui prouve une altération des silicates du complexe absorbant. Il migre d'ailleurs plus en profondeur et dépasse légèrement l'horizon B'. Si l'on calcule alors un indice d'entraînement, on obtient la valeur de 6,1.

Le mor très net, l'horizon A'2 cendreux, et les indices d'entraînement du Fer libre et de l'Aluminium libre, caractérisent un **véritable podzol humo-ferrugineux.**

Les horizons sous-jacents sont ceux du sol lessivé de départ. Il faut noter que la podzolisation s'est toujours effectuée, dans tous les cas envisagés ici, à partir d'un sol précédemment lessivé, dont la base demeure toujours visible. Il s'agit donc là de « **sols polyphasés** » selon la classification établie au 6ᵉ Congrès International de la Science du Sol (Glangeaud, 1956).

ESSAI D'INTERPRETATION DES ANALYSES D'Al ET DE Fe :

Le Fer indiquant l'intensité de l'entraînement et l'Aluminium mettant plus particulièrement en évidence l'altération, ces deux métaux présentent un intérêt particulier et soulèvent maints problèmes quant à leur dynamique (Duchaufour, 1964 ; Juste, 1966) en raison de leur liaison avec la matière organique (Wright and Schnitzer

1963 ; Mortensen, 1963 ; Duchaufour, 1964 ; Brückert et Dommergues, 1966 ; Brückert et Jacquin, 1966 ; Duthion et Chrétien, 1966).

Nous avons commenté, au passage, pour chaque sol les résultats des analyses d'aluminium et de fer libres. Nous disposons d'autre part d'une série d'analyses, effectuées au Centre de Pédologie biologique de Nancy, pour Al et Fe complexés par la matière organique. Deux valeurs ont été établies, correspondant à la liaison avec les acides humiques d'une part, avec les acides fulviques d'autre part. Nous réunissons, dans le tableau suivant, les résultats obtenus pour les teneurs en matière organique et en Fe et Al sous leurs formes libres et complexées.

Nous gardons ici le tableau de la séquence complète afin de permettre une meilleure appréciation.

Sols	Horiz	M. O. %	Fe ‰ libre	Fe ‰ H + F	Fe ‰ H	Fe ‰ F	Al ‰ libre	Al ‰ H + F	Al ‰ H	Al ‰ F
Sol brun lessivé	A_{11}	5,90	4,6	0,15	0,12	0,03	0,38	0,42	0,26	0,16
	A_{12}	3,10	4,7	0,01	0,01	0,00	0,45	0,04	0,03	0,01
Sol lessivé ×	A_1	3,90	2,5	0,26	0,18	0,08	0,30	0,42	0,23	0,19
Sol lessivé néopodzolique	A'_1	4,96	1,1	0,15	0,11	0,04	0,18	0,28	0,15	0,13
	A'_2	1,93	1,6	0,13	0,11	0,02	0,20	0,29	0,16	0,13
	B'	1,74	1,7	0,06	0,04	0,02	0,37	0,16	0,06	0,10
Sol lessivé × néopodzolique	A'_1	4,70	1,6	0,14	0,11	0,03	0,18	0,24	0,11	0,13
	B'	1,18	2,8	0,08	0,07	0,01	0,35	0,20	0,08	0,12
Sol podzolique	A'_1	6,17	1,5	0,12	0,08	0,04	0,17	0,24	0,07	0,17
	B'	1,30	3,6	0,05	0,04	0,01	0,24	0,17	0,06	0,11
Podzol	A'_{11}	9,62	1,7	0,11	0,08	0,03	0,23	0,06	0,02	0,04
	A'_{12}	3,00	0,8	0,06	0,04	0,02	0,09	0,12	0,05	0,07
	B'	1,14	4,0	0,03	0,01	0,02	0,31	0,04	0,02	0,02
Podzol ×	A'_{11}	8,75	1,3	0,09	0,06	0,03	0,20	0,12	0,04	0,08
	A'_{12}	2,18	0,9	0,05	0,04	0,01	0,10	0,14	0,05	0,09
	B'	1,06	3,9	0,05	0,04	0,01	0,32	0,25	0,11	0,14

TABLEAU 4
H : *acides humiques*
F : *acides fulviques*
* : *sols précédemment cités*

Le Fer. — L'entraînement en profondeur du Fe libre et son accumulation dans les horizons B ou B' prouve l'existence du lessivage. Celui-ci est de plus en plus accentué si l'on considère la séquence de sols dans le sens de la podzolisation croissante. L'augmentation de l'indice d'entraînement indique bien cette évolution progressive : 1,3 pour le sol brun lessivé, 2 et 2,2 pour les sols lessivés néopodzoliques, 3,6 pour les sols podzoliques, 5,6 pour les podzols.

Pour le Fe complexé, il faut noter que dans tous les cas, même pour les podzols, le fer est fixé sur les acides humiques plutôt que sur les acides fulviques. Ces acides humiques, polymérisés, forment donc, avec le Fe, des complexes organo-minéraux insolubles assez stables, qui ne migrent pas ou peu (Duchaufour, 1963).

L'abondance relative du fer libre dans l'horizon de surface des sols lessivés peut sans doute faciliter la complexation avec les colloides minéraux.

Il existe donc des formes complexées assurant les liaisons fer-matière organique et fer-argile (Segalen, 1964). Et celles-ci pourraient favoriser l'établissement d'une structure relativement bonne qui freinerait le lessivage et a fortiori la podzolisation, ceci d'autant plus que le fer serait plus abondant au départ.

Pour conclure ces résultats, nous pensons, selon une suggestion de Ph. Duchaufour, que le fer ferrique, en milieu très aéré, a un rôle de frein pour la podzolisation.

Si l'on compare les formes libres et complexées, on remarque d'une part la très nette supériorité des valeurs de fer libre et d'autre part la différence d'évolution avec la profondeur : le fer libre augmente dans les horizons B, d'autant plus que la podzolisation est plus marquée tandis que le fer complexé diminue en profondeur. Ce qui permettrait de penser qu'il ne resterait pas à l'état complexé, mais passerait très rapidement à l'état libre, selon un phénomène d'échange au niveau de tous les horizons.

L'Aluminium. — Les teneurs d'Al libre sont plus élevées en profondeur et les horizons B des podzols sont plus riches que ceux des sols lessivés, comparativement aux horizons les plus pauvres, donc les indices d'entraînement augmentent avec la podzolisation. Ceci indique l'importance croissante de la migration parallèlement à l'altération qui caractérise la podzolisation.

Al complexé est plus abondant que Fe complexé, ce qui peut signifier d'une part que Al pourrait rester à l'état complexé plus facilement que Fe, et d'autre part que Al aurait plus tendance à se complexer, donc à migrer, car Al est surtout lié aux acides fulviques. Ceux-ci étant très solubles forment avec Al des complexes qui ne se polymérisent pas, migrent et ne deviennent insolubles qu'au niveau de l'horizon B. Les sols lessivés ont malgré tout une teneur plus forte d'Al lié aux acides humiques, sans doute cause de la proportion plus importante de ces derniers dans la matière organique. En conclusion, nos observations confirment que Al apparaît plus mobile que Fe (Duchaufour et Souchier, 1968).

La plus forte teneur en Al libre et complexé pour les sols lessivés doit-elle être interprétée comme freinant la podzolisation ?

La comparaison Al libre - Al complexé met en évidence la dominance de la forme complexée, du moins pour les horizons A de la plupart de ces sols. Cela signifie sans doute que le réactif de Tamm, employé pour Al libre, ne pourrait extraire Al complexé (pour une question de pH).

D'autre part Al libre augmente en profondeur tandis que Al complexé diminue ou demeure constant et n'augmente que dans le cas des podzols, ce qui s'explique puisque ce sont les seuls sols à posséder un horizon d'accumulation.

Enfin ces analyses nous suggèrent une conclusion de Ph. Duchaufour (communication personnelle) : « Sans aucun doute, la podzolisation sous forêt feuillue n'est possible, en milieu aéré, que sur des roches-mères très pauvres en aluminium et surtout en fer altérable. »

III. — DISCUSSION SUR LA PEDOGENESE.

Nous envisagerons successivement l'action du climat, de la roche-mère et de la végétation qui expliquent la formation du podzol... sans pour cela donner la réponse à quelques problèmes qui restent à résoudre.

A) LE CLIMAT.

La faible température moyenne entraîne une décomposition de la matière organique assez lente et de ce fait une **acidification.** Les pluies assez marquées toute l'année, avec minima en août et septembre, évitent les pertes par évaporation et donnent lieu à un drainage important pendant cinq mois. **Ces migrations descendantes provoquent le lessivage qui prépare la podzolisation.**

Le climat local est donc favorable à la formation des sols lessivés et des podzols.

B) LA ROCHE-MERE.

Celle-ci constitue le facteur primordial dans la genèse des sols de cette séquence.

1° Nature de la roche-mère :

a) **La granulométrie** de ces « limons des plateaux » indique une **texture sableuse.** Le matériel particulièrement filtrant peut donc assurer le lessivage important fonction du

drainage climatique. D'autre part, l'**absence particulière des colloïdes minéraux** dans le cas des sols podzoliques et des podzols explique la formation d'une mauvaise structure qui facilite le phénomène d'entraînement.

b) **La nature minérale** presque uniquement quartzeuse facilite la podzolisation par sa **pauvreté en minéraux altérables** : les argiles altérées libèrent des sesquioxydes en trop faible quantité pour qu'il y ait polymérisation sur place de complexes organo- minéraux stables ou insolubles. Les complexes formés pseudosolubles migrent jusqu'en Bh et Bs. La différenciation morphologique des horizons est alors très nette (Duchaufour et Souchier, 1965 ; Duchaufour, 1967).

2° **Epaisseur de la roche-mère.**

a) Celle-ci intervient en premier lieu tout simplement dans les **phénomènes d'entraînement.** Le lessivage en argiles et en bases sera d'autant plus profond que les limons seront plus épais, le pH restant acide sur une plus forte épaisseur de sol. Cet appauvrissement, déclenché par l'épaisseur de roche-mère, prépare donc la podzolisation.

b) Elle peut aussi intervenir sur les **remontées** dans les profils à cause de l'influence plus ou moins grande du calcaire sous-jacent. Dans le cas de remontées par simple diffusion, le calcium pourra plus difficilement atteindre les horizons supérieurs d'un sol épais. D'autre part les remontées biologiques par la faune (vers de terre) sont plus importantes dans les sols peu épais.

c) Si la « nature » de la roche-mère, par sa teneur en argile peut avoir une influence sur la **structure,** il en est de même de l'épaisseur de roche-mère :

— de manière directe, par l'action floculante du calcium : dans un sol peu épais, une bonne répartition du Ca^{++} permet la cimentation des particules et assure une structure en agrégats relativement stable ;

— de manière indirecte par l'action du calcium sur l'humification : dans un sol peu épais, la présence de calcium favorise une bonne humification. Il y a polymérisation de complexes organo-minéraux insolubles, qui se minéralisent assez rapidement, par suite de l'activité des micro-organismes (Duchaufour et Jacquin, 1963-1964). La richesse en cations des sols peu épais leur assure donc une bonne structure. Tandis que si le sol est très épais la formation d'acides fulviques déclenche l'altération chimique des argiles et l'absence d'activité biologique (Duchaufour, 1967).

Les complexes organo-minéraux alors formés migrent et ne s'insolubilisent qu'en un horizon B' de podzol (Dommergues et Duchaufour, 1965 ; Jacquin et Brückert, 1965 et 1966).

Cependant, ce facteur « épaisseur de la roche-mère » est-il si important lorsque l'on considère non loin de cette séquence, des sols seulement lessivés ou néopodzoliques sur forte épaisseur de la même roche-mère ? Lorsque l'on compare alors les teneurs en argiles : nulles pour les podzols sur limons épais, faibles mais non négligeables pour les sols lessivés, on serait plutôt tenté de croire que la « nature » de la roche-mère n'a pas une importance moindre.

3° Il faut noter le rôle du **relief** dans le lessivage oblique : l'entraînement des colloïdes se fait en surface et dans la masse du profil, avec appauvrissement du sommet des pentes et enrichissement des cuvettes, comme nous avons pu le constater à propos du sol lessivé.

C) LA VEGETATION.

Il s'agit d'une forêt ; or on sait que ce type de végétation protège le sol contre l'érosion, crée une ambiance ombragée et humide et favorise au maximum les courants d'eau descendants, ce qui provoque le lessivage. Cependant ces trois points restent un facteur commun aux différents sols observés. Mais considérant la variation d'épaisseur de la roche-mère, nous avons voulu étudier la recharge en surface par les litières. D'autre part la présence de quelques vieux chênes vestiges d'une chênaie antérieure à l'actuelle hêtraie nous a incités à comparer, par une expérience de percolation, le rôle respectif de ces deux feuillus dans la pédogenèse.

1° **Remontée biologique.** Considérant des sols lessivés peu épais et des podzols très épais, nous avons supposé que le cycle du calcium pouvait être fort différent dans les deux cas (Rühl, 1957), d'où l'idée d'analyser les litières. Et ceci nous amène à distinguer l'influence des deux principales strates végétales.

a) **Strate arborescente.** La litière recueillie en automne immédiatement après la chute des feuilles donne à l'analyse les résultats suivants (tableau n° 5).

Profil	Cendres tot. %	C. insol. %	C. sol. %	Ca %	Mg %	Ca + Mg %
Sol lessivé	7, 30	3, 66	3, 64	1, 52	0, 22	1, 74
Sol lessivé néopodzolique	7, 30	4, 00	3, 30	1, 42	0, 28	1, 70
Podzol	7, 70	3, 68	4, 02	1, 55	0, 23	1, 78

TABLEAU 5

Nous pouvons constater que la **remontée biologique au niveau de la strate arborescente, semblable quelle que soit l'épaisseur de la roche-mère, ne constitue pas ici une cause de la podzolisation.**

b) **Strate herbacée.** Celle-ci agit sur l'évolution du sol en freinant le phénomène d'entraînement et surtout en déterminant la nature de l'humus. Si les graminées ne possèdent en moyenne que 0,52 % de Ca contre 1,6 % pour les feuillus, il faut cependant penser que lorsque cette strate est présente, elle contribue à la recharge en Ca des horizons du sol. Mais le plus important est sans doute la richesse en N de ces graminées (1,45 % au lieu de 0,95 % pour les feuillus) laquelle assure une plus grande activité microbiologique du sol et, ainsi, une minéralisation plus rapide de la matière organique (Lemée, 1967). On peut donc conclure que la **présence de strate herbacée a plutôt un rôle de frein pour le lessivage tandis que son absence favorise le phénomène de podzolisation** comme le supposait déjà Avery (1958).

2° **Comparaison Chêne-Hêtre - Expérience de percolation.** La présence de podzols sous feuillus fut rarement considérée et pourtant le chêne et le hêtre ont un rôle dans cette pédogenèse (Bonneau et Duchaufour, 1960), en particulier par leurs litières dont la décomposition peut avoir des effets importants (Bloomfield, 1956 ; Mangenot, Jacquin et Metche, 1965 ; King et Bloomfield, 1966 ; Lossaint, 1966). Dans le but de comparer l'action du chêne et celle du hêtre, nous avons fait un prélèvement sous chacune de ces essences pour chaque phase de la séquence. Or les analyses de sols donnent des résultats équivalents sous chênes et sous hêtres. Mais ceci ne permet aucune conclusion, étant donné que la chênaie a précédé la hêtraie actuelle. Nous avons donc voulu poursuivre cette comparaison en étudiant expérimentalement l'influence des litières différentes sur la mobilisation du Fer dans les sols.

Les auteurs semblent partagés quant à l'action podzolisante de ces deux espèces : « Le chêne est nettement moins défavorable que le hêtre » (Duchaufour, 1965). Cependant, Lossaint (1959) trouve que la litière de chêne in vitro solubilise plus de fer que celle de hêtre (à la suite d'expériences menées en laboratoire dans des tubes contenant un mélange de terre et de poudre de litière).

Nous avons réalisé, au laboratoire, dans des tubes, une expérience de percolation d'eau au-dessus de litières grossièrement broyées en fragments de quelques mm et reposant sur un substrat sableux homogène (un horizon AB) identique dans tous les tubes. Nous avons choisi huit variantes pour recouvrir le substrat :

L (litière de l'année)	Hêtre	LH
	Chêne	LC
	Graminées	Lh
F (litière de l'année précédente)	Hêtre	FH
	Chêne + hêtre	FHC
	Graminées + hêtre	FHh
Humus	H mor	HM
	H moder	Hm

Ces huit variantes, plus un substrat témoin sans litière, firent l'objet de montages en conditions aérobie et anaérobie. Les dosages de fer dans les percolats recueillis donnent des résultats (en mg de fer pour 100 g de sol et pour 100 g de litière) que nous consignons ici dans la figure n° V.

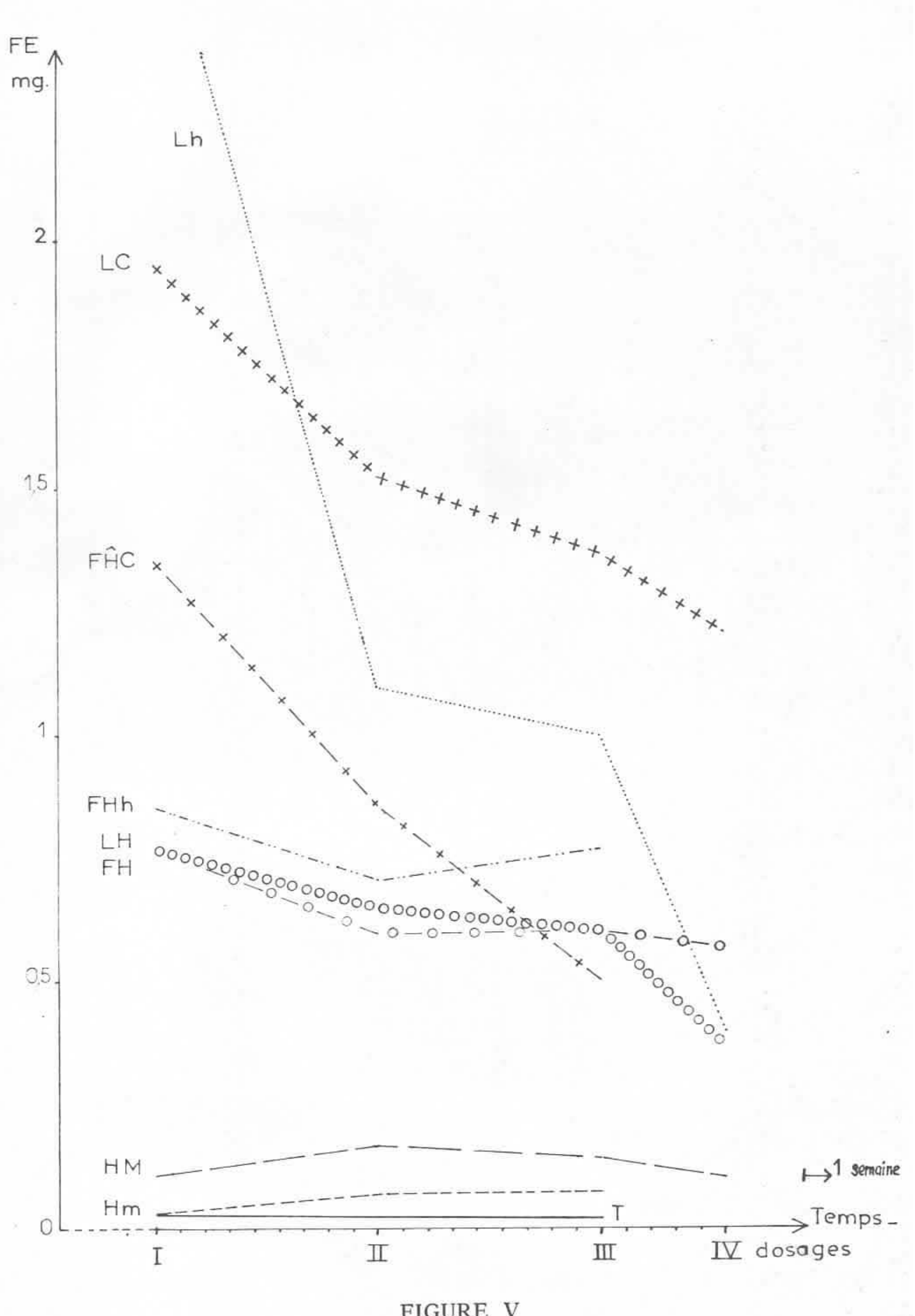


FIGURE V

— *Percolation Anaérobie*

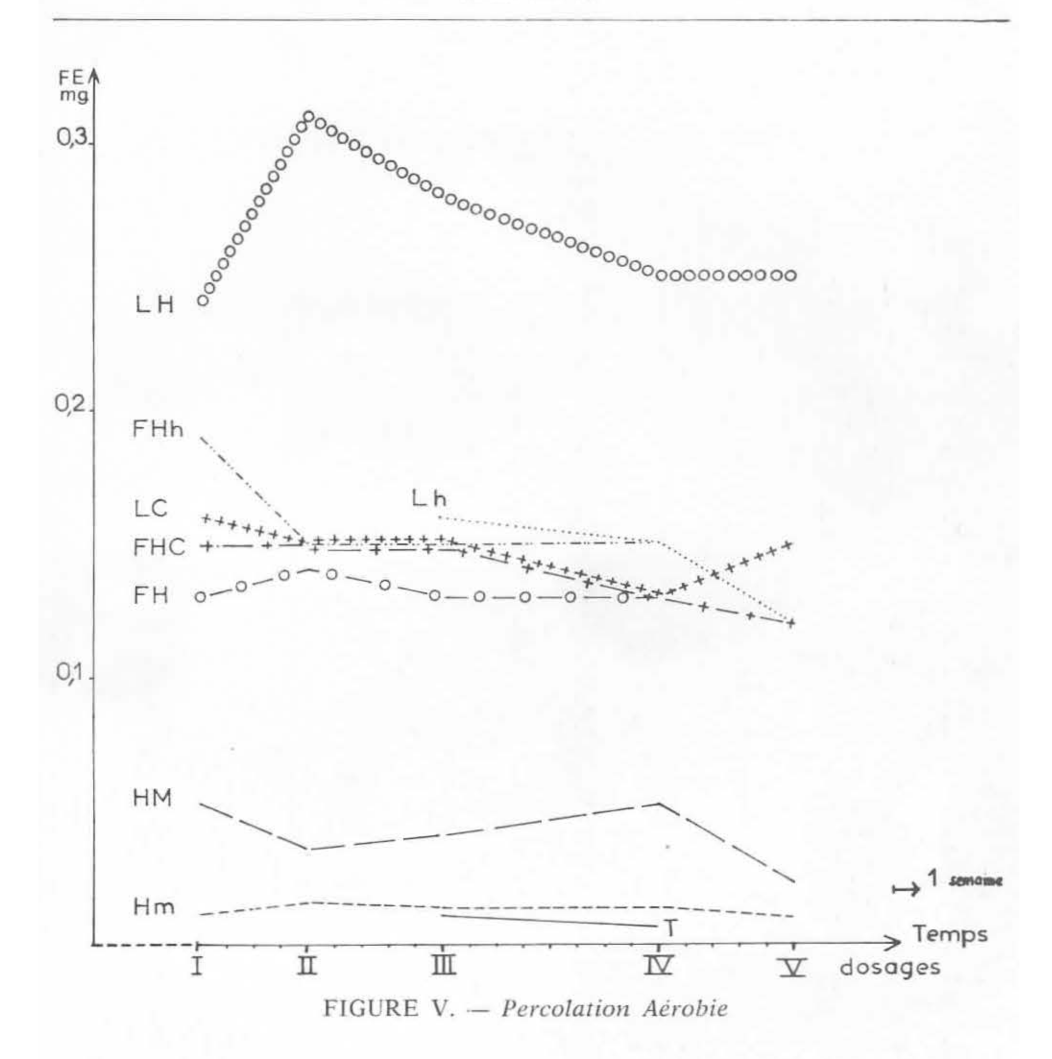


FIGURE V. — *Percolation Aérobie*

On peut remarquer les teneurs très supérieures dans le cas de l'anaérobiose par rapport à l'aérobiose, ce qui s'explique car le fer migre à l'état ferreux, donc préférentiellement en milieu réducteur tandis qu'il est très peu soluble à l'état ferrique. On peut aussi remarquer la décomposition très rapide de l'herbe Lh qui donne une grande quantité de matières hydrosolubles particulièrement réductrices permettant ainsi un grand entraînement du fer dès le départ et qui diminue très vite.

Mais comment expliquer le fait que le chêne entraîne nettement plus de fer que le hêtre en condition anaérobie, tandis que l'on observe le contraire en condition aérobie ? Vu les connaissances acquises depuis 1960 au sujet des phénomènes d'entraînement et de migration, nous supposons que le milieu réducteur, déclenché par l'anaérobiose permet un entraînement du fer plus intense pour le chêne que pour le hêtre, car dans ces conditions, ce serait surtout la quantité de matières hydrosolubles qui jouerait un rôle. Or le chêne est beaucoup plus riche en matières hydrosolubles que le hêtre, comme le montre Lossaint. Par contre, en aérobiose, le hêtre entraîne plus de fer (ce qui ne concorde plus avec les résultats de Lossaint... mais il faut remarquer que nous sommes plus proches des conditions naturelles dans notre expérience).

On peut supposer une influence des microorganismes sur ce phénomène de migration du fer : si les substances hydrosolubles et complexantes du chêne sont plus abondantes, ne sont-elles pas plus rapidement détruites par action biologique dans la nature ? Ceci expliquerait l'action plus dégradante du hêtre habituellement reconnue.

D) QUELQUES PROBLEMES POSES A PROPOS DE L'ORIGINE DES PODZOLS DE LA TILLAIE.

Si le climat, la nature et l'épaisseur de la roche-mère, l'absence de strate herbacée sont des facteurs qui s'ajoutent et permettent ainsi d'expliquer la formation du podzol, bien des questions restent à étudier :

1° L'horizon B du sol lessivé que l'on retrouve aussi à la base des podzols représente-t-il un paléosol ou seulement un B de sol lessivé ?

Sa couleur ocre rouge assez prononcée permet de pencher à un B de paléosol, mais on peut néanmoins l'attribuer à la proximité du calcaire, comme cela s'observe fréquemment en pédogenèse post-glaciaire (Horemans, communication orale). D'ailleurs on peut sans doute parler d'un horizon β qui à la base du B, correspond à un front de décarbonatation. Afin de déterminer si le matériau était homogène sur tout le profil, nous avons établi les rapports $\frac{\text{sables}}{\text{limons}}$ ainsi que les courbes cumulatives, pour les sols que nous avons étudiés. Les résultats sont variables : les courbes cumulatives semblent se répartir en deux familles, dont nous indiquons la plus typique pour chacune (fig. n° VI).

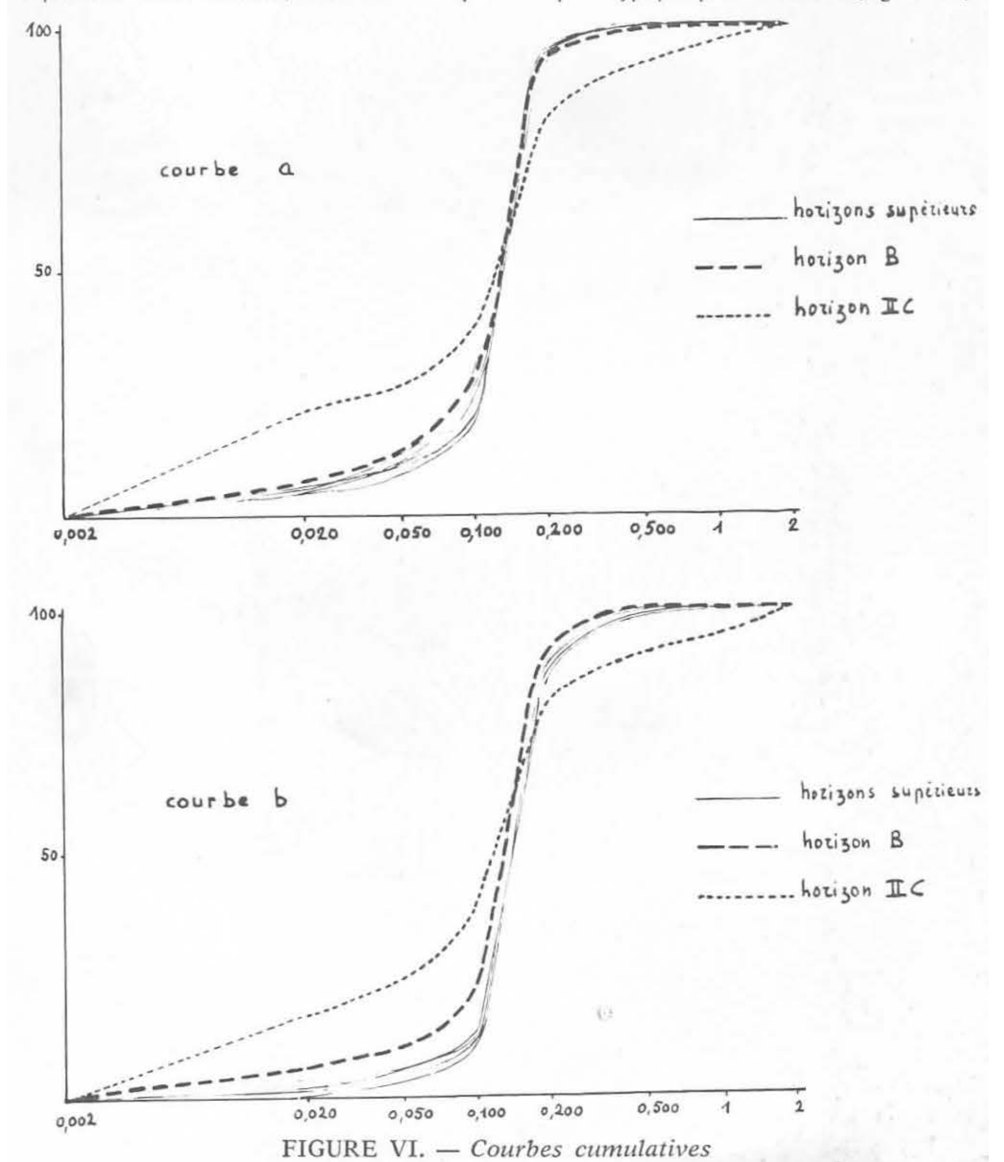


FIGURE VI. — *Courbes cumulatives*

Il faut remarquer que, dans tous les cas, l'horizon IIC est plus riche en particules fines que les autres horizons : cet horizon n'ayant pas été décarbonaté contient beaucoup moins de sables siliceux de 100 à 200 μ mais beaucoup plus de particules fines qui sont surtout calcaires.

Quant à l'horizon B, son matériau semble avoir la même constitution que celui des autres horizons dans la courbe a, tandis que la courbe b indique des différences : l'enrichissement relatif de l'horizon B dans la partie fine pourrait faire penser à une fragmentation éventuelle des grains grossiers, surtout dans ce milieu riche en fer, mais l'allure terminale de la courbe dans la partie grossière semble annuler cette éventualité, ce qu'il faudrait encore vérifier par une analyse de la partie fine entre 2 et 20 μ (communication orale, Freytet).

Des analyses granulométriques plus nombreuses, sur d'autres profils, permettraient de vérifier l'homogénéité ou l'hétérogénéité (courbe a ou b) du matériau.

Leur alternance pourrait correspondre soit à un soufflage irrégulier, soit à deux dépôts datant de stades ou glaciations différentes ; le plus ancien aurait parfois pu être érodé et la continuité du paléosol ne serait alors qu'apparente.

2° **Combien d'apports différents de limons faudrait-il donc envisager ?**
Une intercalation de sable jaune au milieu d'un horizon B très épais, à quelques centaines de mètres des sols étudiés ici, correspond-elle à un autre dépôt (peut-être comparable au limon inférieur de Morand) ? Déterminer alors les périodes de dépôts (on connaît déjà l'existence d'un lœss d'âge Magdalénien dans la région de Nemours, Dupuis, 1961) et l'intervention des actions périglaciaires dans la pédogenèse : autant de questions à résoudre sur ces phénomènes quaternaires.

3° **L'âge du Podzol ?** Vu la différenciation relativement peu poussée au niveau de ses horizons Bh et Bf et vu toute l'évolution progressive que la séquence met en évidence depuis le stade cryptopodzolique, on peut penser qu'il s'agit d'un podzol relativement récent. Une datation par le C-14 sera intéressante à condition de comparer les résultats avec ceux d'autres méthodes.

4° Quant à **l'origine du podzol** elle soulève plusieurs questions et, la strate arborescente ayant varié au cours des temps, son évolution permet plusieurs hypothèses. Mais en conclusion, si la formation du podzol sous pineraie boréale (— 8000) est sans doute à rejeter à cause du B humique peu développé, celle de sa formation sous chênaie atlantique (— 6000) est aussi peu probable étant donné que tous les sols de la forêt de Fontainebleau auraient pu se podzoliser pendant les 4.000 ans de latitude du chêne avant l'apparition du hêtre.

Par contre, la formation du podzol sous hêtraie subboréale (— 2000) paraît plus vraisemblable à moins d'envisager une podzolisation beaucoup plus récente encore, à la faveur du dernier peuplement de hêtres (réapparus depuis le précédent peuplement de chênes dont les derniers témoins disparaissent actuellement) et d'éclaircies brutales causes d'un déséquilibre éventuellement important. Il faut noter toutefois la pauvreté en pollens d'Ericacées des horizons A_0 et A_1 du podzol ce qui élimine l'éventualité de sa formation sous lande (communication orale, Lemée). L'intervention d'éclaircies brutales aurait permis un début de dégradation et le remplacement progressif du chêne par le hêtre aurait conduit à l'établissement d'une hêtraie « climax » (Duchaufour, 1965), la hêtraie à Mull sur sols lessivés correspondant au climax climatique, et la hêtraie à mor sur podzols constituant un climat stationnel.

CONCLUSION.

Nous avons donc observé dans une réserve de la forêt de Fontainebleau une séquence de sols lessivés, sols podzoliques et podzols, sous feuillus. La comparaison de chaque profil sous chêne et sous hêtre n'a guère pu fournir de distinction sur le rôle de chacun des deux feuillus dans l'évolution pédogénétique. L'expérience de percolation, très réduite, permettrait de retrouver les conclusions habituelles : le chêne fournirait plus de substances hydrosolubles que le hêtre, mais elles seraient immédiatement dégradées par l'activité microbiologique, ce qui tendrait à donner à la matière organique du hêtre un rôle plus complexant pour le fer, donc plus dégradant et podzolisant. Néanmoins nous

n'avons encore aucun argument pour préciser la végétation sous laquelle s'est formé le podzol, ce qui n'empêche pas d'espérer résoudre cette question en même temps que celle de l'âge du podzol.

De toute manière, il faut attribuer au facteur roche-mère une forte responsabilité dans le phénomène de podzolisation, soit par son épaisseur, soit par sa nature, cette dernière étant peut-être beaucoup plus importante que nous ne l'avions décelé au départ.

Les sols lessivés peu épais (que nous avons étudiés) bénéficiant de la proximité du calcaire et les sols lessivés épais, qui se trouvent dans les environs, profitant de leurs argiles pour maintenir une structure de mull (dont l'activité biologique ne cesse de jouer son rôle) représentent le climax climatique.

Par contre, la forte épaisseur de sol liée à la pauvreté en argiles explique la formation d'un mor, permettant au maximum le lessivage déjà favorisé par le caractère très percolant du matériau sableux. De plus, la nature presque essentiellement quartzeuse de la roche-mère ne permet, par sa pauvreté en minéraux altérables, qu'une faible libération de sesquioxydes, l'entraînement est alors maximum. Le podzol constitue donc lui aussi, sous le climat actuel, le terme d'une évolution, la hêtraie sur podzol représentant alors un climax édaphique.

REMERCIEMENTS.

Je désire exprimer ici ma profonde reconnaissance à MM. les Professeurs Lemée, Dupuis, Duchaufour et Glangeaud qui m'ont permis d'entreprendre ce travail et de le mener à bien.

Je remercie également MM. Souchier, Horemans et Guittet pour l'aide qu'ils m'ont apportée par leurs conseils, soit sur le terrain, soit au laboratoire.

Reçu pour publication le 14 novembre 1969.

Bibliographie

AILMEN H. (1936). — Etude sur le stampien du Bassin de Paris. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, pp. 107-231.

ALIMEN H. et VATAN A. (1937). — Contribution à l'étude pétrographique des sables stampiens. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, (5) VII, pp. 141-162.

ARLERY R., GARNIER M., LANGLOIS R. (1954). — Application des méthodes de Thornthwaite à l'esquisse d'une description agronomique du climat de la France. *La Météorologie*, Oct.-déc., pp 348-367.

AVERY B.-W. (1958). — A sequence of beechwood soils on the chiltern hills, England. *J. Soil Sc.*, 9, n° 2, pp. 210-224.

BLOOMFIELD C. (1956). — The experimental production of podzolisation. *VIe Congrès Intern. Sc. Sol* V. 3, vol. E, p. 21-23.

BONNEAU M. et DUCHAUFOUR Ph. (1960). — Les sols de la hêtraie en Europe occidentale. *Bull. Inst. Agro. et St. Rech. Gembloux*, V. 1.

BRUCKERT S. et DOMMERGUES Y. (1966). — Etude expérimentale de la biodégradation de deux complexes organoferriques dans un sol à mor et dans un sol à mull. *Sc. du Sol*, 2, pp. 65-76.

BRUCKERT S. et JACQUIN F. (1966). — Relation entre l'évolution des acides hydrosolubles de deux litières forestières et les processus pédogénétiques. Bull. *E.N.S.A.N.T.* VIII, f. 2.

CAILLEUX A. (1942). — Les actions éoliennes périglaciaires en Europe. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, n° 46, 176 p.

CAILLEUX A. (1951). — Interprétation climatique des éolisations pliocènes et quaternaires en France. *C.R. Somm Soc. Géol. Fr.*, pp. 45-46.

CAILLEUX A. (1953). — Loess et limons éoliens de France. *Bull. Serv. Carte Géol. France*, L I, 240, 24 p., 2 fig.

DEB B. C. (1950). — The estimation of free iron oxides in soils and clays and their removal. *Journ. of Soil. Sc.*, I, pp. 212-220.

DIMBLEBY G. W. and GILL J. M. (1955). — The occurence of podzols under deciduous woodland in the new forest. *Forestry*, 28, pp. 95-106.

DOIGNON P. (1948). — Le mésoclimat forestier de Fontainebleau. *Centre régional de recherches naturalistes*. pp. 19-142.

DOMET P. (1873). — *Histoire de la forêt de Fontainebleau.* Paris, Hachette, 404 p.

DOMMERGUES Y et DUCHAUFOUR Ph. (1965). — Etude comparative de la dégradation biologique des complexes organoferriques dans quelques types de sols. *Sc. du Sol.*, 1, p. 43-59.

DUCHAUFOUR Ph. (1947). — Le hêtre est-il une espèce améliorante ? *Rev. Eaux et Forêts*, pp. 729-737.

DUCHAUFOUR Ph. (1948). — Recherches écologiques sur la chenaie atlantique française. *Ann. de l'Ecole Nat. des Eaux et Forêts*, II, f. 1, Nancy, 332 p.

DUCHAUFOUR Ph. (1951). — Lessivage et podzolisation. *Revue Forest. Fr.*, 6, 647-652.

DUCHAUFOUR Ph. (1957). — Sur le rôle de la matière organique dans les phénomènes de lessivage et de podzolisation. *C.R. Acad. Sc.* 245 p., 1154-1157.

DUCHAUFOUR Ph. (1957). — L'action des divers types d'humus sur les processus d'entraînement dans le sol forestier. *Rev. Forest. Fr.*, n° 12, pp. 887-897.

DUCHAUFOUR Ph. (1959). — La dynamique du sol forestier en climat atlantique. *Presses Universitaires* Laval, Québec, Canada.

DUCHAUFOUR Ph. (1961). — Rôle de la végétation dans l'évolution des sols. I. Les types d'humus forestiers, reflets de la station ou de la végétation. *Bull. Ass. Fr. Etude Sols*, pp. 168-193.

DUCHAUFOUR Ph. (1963). — Note sur le rôle du Fer dans les complexes argilo-humiques. C.R. Ac. Sc. (Paris), t. 256, 12, pp. 2657-2660.
DUCHAUFOUR Ph. (1964). — Sur la dynamique de l'aluminium dans les sols podzoliques. C.R. Acad. Sci., 259, pp. 3307-3309.
DUCHAUFOUR Ph. (1964). — Evolution de l'aluminium et du fer complexés par la matière organique dans certains sols. Sc. Sol., n° 2, pp. 3-17.
DUCHAUFOUR Ph. (1965). — *Précis de Pédologie*, éd. Masson et Cie, Paris, 2e éd., 481 p.
DUCHAUFOUR Ph. (1965). — Le problème du climat et l'évolution des sols. *Oecol. Planta.*, vol. 1, pp. 165-174.
DUCHAUFOUR Ph. (1967). — La podzolisation en climat atlantique. *Annales de Edafologia y Agrobiologia dédié à la mémoire du Pr. Albareda*, Madrid.
DUCHAUFOUR Ph. et JACQUIN F. (1963). — Recherche d'une méthode d'extraction et de fractionnement des composés humiques contrôlés par l'électrophorèse. *Ann. Agro.*, 14 (6), pp. 885-918.
DUCHAUFOUR Ph. et JACQUIN F. (1964). — Résultats des recherches récentes sur l'évolution de la matière organique dans les sols. *Acad. Agri. France*, pp. 376-387.
DUCHAUFOUR Ph. et SOUCHIER B. (1965). — Note sur un problème de classification, podzolisation chimique et différenciation du profil. *Pédologie*, XV, 2, pp. 143-158.
DUCHAUFOUR Ph. et SOUCHIER B. (1966). — Note sur une méthode d'extraction combinée de l'aluminium et du fer libres dans les sols. *Sci. Sol.* n° 1, pp. 17-29.
DUCHAUFOUR Ph. et SOUCHIER B. (1968). — Note sur la migration sélective de l'aluminium dans les sols cryptopodzoliques. *C.R. Acad. Sc. Paris*, t. 266, pp. 204-206.
DUPUIS J. (1952). — Contribution à l'étude des sols du Gâtinais. *Ann. Inst. Nat. Agron.*, t. 39, 256 p.
DUPUIS J. (1960). — Carte pédologique schématique au 1/1.000.000 du Nord-Est de la France. *Ann. Inst. Nat. Agr.*, t. 46, 12 p.
DUPUIS J. (1961). — Les sables lœssiques des stations préhistoriques de la vallée du Loing aux environs de Nemours. *Bull. S.P.F.*, LVIII, n° 8, 9, 10.
DUPUIS J. et CAILLEUX A. (1955). — Observations sur les formations superficielles et les sols de la Beauce au sud d'Etampes. *Ann. Agr.*, pp. 373-83.
DUTHION C. et CHRETIEN J. (1966). — Evolution des caractères analytiques de quelques sols forestiers en cours de podzolisation dans les Basses-Vosges. *S. du Sol*, 2, pp. 15-28.
EDELMAN C.-H. (1960). — Podzols forestiers et podzols de bruyères. *Pédologie*, X, pp. 229-249.
FLON H. (1950). — Les sols de la forêt de Fontainebleau. *Bull. A. Fr. Et. Sol.* 7, pp. 6-11.
FLON H. (1956). — Excursion pédologique en forêt de Fontainebleau. *VIe Congr. Intern. Sc. Sol*, Paris, 12 p.
GEIGER R. (1959). — *The climate near the ground*. Harvard University Press.
GLANGEAUD L. (1956). — Classification des sols et hiérarchie des phénomènes en Pédologie. *VIe Congr. Intern. Sc. Sol Paris*, vol. A, pp. 176-179.
HENIN S. et AUBERT G. (1945). — Relations entre le drainage, la température et l'évolution des sols. *C.R. Acad. Sc.*, 220 p. 330.
IABLOKOFF A. Kh. (1953). — *Un carrefour biogéographique : le massif de Fontainebleau. Ecologie des réserves.* Paris. Société d'édition d'enseignement supérieur, 99 p.
JACQUIN F. et BRUCKERT S. (1965). — Identification et évolution des acides hydrosolubles. *C.R. Ac. Sc.* (Paris), t. 260, pp. 4556-4559.
JALUT G. (1967). — Analyse pollinique de la tourbière de l'Archet (S.-et-O.). *Pollen et Spores*. IX, 305-319.
JALUT G. (1967). — Analyse pollinique de deux tourbières de la forêt de Rambouillet. *Th. Doct. 3e cycle, Paris*, 54 p.
JUSTE Ch. (1966). — Contribution à l'étude de la dynamique de l'aluminium dans les sols acides du Sud-Ouest Atlantique. Application à leur mise en valeur. *Ann. Agro.*, t. 17, pp. 251-341.
KING H.G.C. and BLOOMFIELD C. (1966). — The reaction between water soluble tree leaf constituents and ferric oxide in relation to podzolisation. *J. Sci. Fe. Agric.*, 17, pp. 39-43.
LEMEE G. (1966). — Sur l'intérêt écologique des réserves biologiques de la forêt de Fontainebleau. *Bull. Soc. Bot. Fr.*, t. 113, p. 305-323.
LEMEE G. (1967). — Investigations sur la minéralisation de l'azote et son évolution annuelle dans des humus forestiers, in situ. *Oecol. Planta.*, vol. 2, pp. 285-324.
LOSSAINT P. (1959). — Etude expérimentale de la mobilisation du fer des sols sous l'influence des litières forestières. *Ann. Agro.*, 4, pp. 369-414 et 5, pp. 493-542.
LOSSAINT P. (1966). — Complexation du fer par les percolats d'un humus brut d'épicéa incubé à différentes températures. *C.R. Ac. Sc., Paris*, 262, D. 16, pp. 1673-1676.
MACKNEY D. (1961). — A podzol development sequence in oakwoods and heath in Central England. *J. of Soil Sc.* (Oxford), 12-1, pp. 23-40.
MANGENOT F., JACQUIN F. et METCH M. (1965). — A propos des interactions plante-sol. I. Les exudats foliaires peuvent-ils être une source de substances humiques. Oecol. *Planta.* (Paris), vol. 1, pp. 79-102.
MORAND F. (1966). — Observations géomorphologiques et pédologiques dans la région de Fontainebleau. *Bull. Ass. Fr. Et. Quatern.*, 2, pp. 120-138.
MORAND F. (1967). — Géomorphologie des plateaux et platières à Fontainebleau. *Ass. Natur. Vallée Loing et Massif Fontainebleau* XLIII, n° 9-10.
MORTENSEN J.-L. (1963). — Complexing of metals by soil organic matter. *Soil Sci., Soc. Am. Proc.* 27 (2) pp. 179-186.
ROBINSON W. O. (1939). — Method and procedure of soil analysis used in the division of soil chemistry and physics. *U.S. Dept. of Agr.*
RUHL A. (1957). — Eine Auswertung von Streuanalysen aus norddeutschen Mittelgebirgen. *Forstw Centralblatt*, 11-12, pp. 364-376.
SAUVAGE J. (1954). — Palynologie et pétrographie de tourbes et de sédiments de la cuvette parisienne et des Ardennes. *Mém. Serv. Carte Géol. Als.-Lorr.*, n° 12, 69 p.
SEGALEN P. (1964). — Le fer dans les sols. *Initiation et documentations techniques ORSTOM*, Paris, 150 p.
THORNTHWAITE C. W. (1948). — An approach toward a rational classification of climates. *Geographical Review*, 38, 1, pp. 59-94.
TURC L. (1954). — Le bilan de l'eau des sols. *Ann. Agron.* 4, pp. 491-595.
TURC L. (1961). — Evaluation des besoins en eau d'irrigation. Evapotranspiration potentielle. *Ann. Agro.*, 12, pp. 13-49.
TURC L. (1962). — Ressources en eau, évaluation de l'écoulement annuel des cours d'eau. *Congr. Genève sur les régions peu développées*, février.
WRIGHT J. R. and SCHNITZER M. (1963). — Metallo-organic interactions Associated with Podzolisation. *S. Sc. Am. Proc.* 27, 2, p. 171-176.

CONTRIBUTION TO THE STUDY OF PODZOLIZATION-PROCESS UNDER DECIDUOUS WOODLAND

SUMMARY

The examination of a sequence of leached soils, podzolic soils and recent podzols, formed under deciduous woodland from the same parent-rock (the sandy « limons des plateaux ») displays the presence of two climax, in a same patch of the Fontainebleau forest : the climatic climax corresponding to the leached soils under beach-wood with mull, and the site climax for the podzols under beech-wood with mor.

The analysis of profiles does not allow to discern any difference between the soils underlying beeches and those underlying oaks. However a percolation experiment meets the general view according to which the beech would have a stronger podzolization power.

If the problem of the origin and dating of the podzol allows only assumptions, the nature of the parent-rock and as also its variation in thickness in relation to the vegetation explain the evolution of soils towards one climax or the other.